Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft, Sauerstoff und Stickstoff unterhalb der Ionengrenze.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der Hohen Philosophischen Fakultät der Königlichen

Universität Marburg

ACAD.
LUGD.BAT
BIBL.

vorgelegt von

Otto Conrad

aus Mansfeld, Prov. Sachsen.

Marburg a. L. 1915.

Druck von Robert Noske, Borna-Leipzig.

Von der philosophischen Fakultät als Dissertation angenommen
am 26. November 1914.

Berichterstatter: Prof. Dr. F. Richarz.

Meinen lieben Eltern
in Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung.

A. Frühere Untersuchungen.

1. Über Kondensation von Wasserdampf und Kondensationskerne im allgemeinen 1
2. Ozon, in seiner Wirkung auf die Kondensation von Wasserdampf 2
3. Einfluß von ultraviolettem Licht auf die Kondensation von Wasserdampf 4
4. Einfluß von Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf 5

B. Veranlassung zu der vorliegenden Arbeit 6

II. Versuchsanordnung.

1. Die Entspannungsapparatur 7
2. Die Vakuumeinrichtung 10
3. Vorteile der Apparatur 11

III. Versuche.

A. Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft.

1. Die Art der Reinigung ist ohne Einfluß . . . 12
2. Abhängigkeit der Kondensationsgrenze von der Bestrahlungsdauer 12
3. Erniedrigung der Kondensationsgrenze durch Bestrahlung mit Röntgenstrahlen bis zur freiwilligen Kondensation 14
4. Abhängigkeit der freiwilligen Kondensation von der Intensität der Strahlen 16

B. Versuche mit Sauerstoff.

1. Darstellung des Sauerstoffs 19
2. Resultate bei Bestrahlung von Sauerstoff.
   a) Erniedrigung der Kondensationsgrenze . . . 20
   b) Die Wirkung ist stärker als bei Luft . . . 20
3. Der von Röntgenstrahlen in Luft und Sauerstoff gebildete Nebel 21

Seite

C. Versuche mit Stickstoff.
1. Darstellung des Stickstoffes 22
2. Resultate: Es werden keine Kerne gebildet, welche unterhalb der Ionengrenze kondensierend wirken 22

IV. Zusammenfassung und Diskussion der Resultate 23

V. Folgerungen aus den Resultaten über die Natur der unterhalb der Ionengrenze auftretenden Nebelkerne 23

Nachtrag. Ergänzende Versuche.

I. Gleichheit der von ultravioletten und von Röntgenstrahlen erzeugten Kerne 27

II. Bestrahlung von reinem Wasserdampf in Abwesenheit von Sauerstoff gibt keine Kerne 28

I. Einleitung.

A. Frühere Untersuchungen.

1. Über die Kondensation und Kondensationskerne im allgemeinen.

Die Versuche, welche mit Hilfe der Dampfstrahlmethode und mit der adiabatischen Entspannungsmethode über die Kondensation von Wasserdampf in Gegenwart anderer Gase angestellt worden sind, haben gezeigt, daß die Möglichkeit des Auftretens der Kondensation des Wasserdampfes, abgesehen von den Fällen sehr hoher Übersättigung, an die Gegenwart von „Kernen" gebunden ist. Welcher Natur diese Nebelkerne sind, wurde insbesondere von R. v. Helmholtz und F. Richarz,[1]) ferner von J. Kießling,[2]) C. T. R. Wilson,[3]) E. Barkow[4]) und E. Pringal[5]) festgestellt. Nach diesen können nämlich Staub und Ionen, noch weitgehender aber hygroskopische Substanzen als Ansatzkerne für den Wasserdampf dienen. An Staub und Ionen kann der Wasserdampf sich nur dann niederschlagen, wenn auf irgendeine Art eine genügend große Übersättigung herbeigeführt ist. In einem mit Wasserdampf gesättigten staubhaltigen Gas kann durch eine geringe Übersättigung eine Nebelbildung hervorgerufen werden. In staubfreien, ionisierten Gasen tritt nach C. T. R. Wilson eine Kondensation von Wasserdampf erst oberhalb einer bestimmten Entspannungsgrenze, der Ionengrenze, auf. Die Einwirkung von hygroskopischen Substanzen auf die

---

[1]) R. v. Helmholtz: Wied. Ann. 32 (1887) S. 1; R. v. Helmholtz und F. Richarz: 40 (1890) S. 169, 59 (1896) S. 592.

[2]) J. Kießling, Untersuchungen über Dämmerungserscheinungen, Hamburg und Leipzig bei Voß 1888.

[3]) C. T. R. Wilson: Phil. Trans. London A. vol. 189 (1897) p. 265—307.

[4]) E. Barkow, Diss. Marburg 1906, S. 75 ff.

[5]) E. Pringal, Diss. Marburg 1908, S. 23.

Kondensation von Wasserdampf und anderen Dämpfen wurde zuerst von R. v. Helmholtz und F. Richarz mit der Dampfstrahlmethode sicher nachgewiesen. Der Einfluß einer hygroskopischen Substanz auf die Kondensation von Wasserdampf ist häufig so stark, daß überhaupt keine Übersättigung notwendig ist, um eine Nebelbildung hervorzurufen, so daß die sogen. freiwillige Kondensation eintritt. Man könnte demnach jede freiwillige Kondensation auf die Anwesenheit einer hygroskopischen Substanz zurückführen. Eine besondere Stellung unter den Nebeln mit hygroskopischen Kernen nimmt der vielbeobachtete sogen. „blaue Nebel“ ein. Dieser ist besonders stark in reinem Sauerstoff und sauerstoffhaltigen Gasen beobachtet worden. Welcher Natur waren nun die Kerne des blauen Nebels? Aus reinem Wasser konnten die Nebeltröpfchen nicht bestehen, da diese langen Bestand haben, ohne zu verdunsten, und nach C. T. R. Wilson[1]) sogar in ungesättigtem Wasserdampf entstehen können. Da nun der blaue Nebel besonders in reinem Sauerstoff beobachtet worden war, vermutete C. T. R. Wilson[1]) als gelöste Substanz in den Tröpfchen des blauen Nebels das Wasserstoffsuperoxyd. Durch eine Reihe von Untersuchungen versuchte E. Barkow[2]) Wasserstoffsuperoxyd in den Tröpfchen des blauen Nebels nachzuweisen.

2. Einwirkung von Ozon.

Aus E. Barkows Versuchen geht hervor, daß der blaue Nebel besonders stark auftritt bei der Bildung bezw. Gegenwart von Ozon und daß das Auftreten des häufig intensiv blau erscheinenden Nebels der Bildung bezw. Gegenwart von Ozon parallel geht. Daß Ozon nicht selbst der Träger des beobachteten blauen Nebels ist, geht indirekt aus den Versuchen von Meißner,[3]) R. v. Helmholtz und F. Richarz,[4]) direkt aus

---

[1]) C. T. R. Wilson: Phil. Trans. London A. vol. 192 (1899) p. 403—453.

[2]) E. Barkow, Diss. Marburg 1906, S. 48.

[3]) Meißner, Untersuchungen über den Sauerstoff S. 309, Hannover 1863.

[4]) R. v. Helmholtz und F. Richarz: Wied. Ann. 40 (1890) S. 167, 175, 194/95.

denen von E. Barkow,[1]) E. Pringal,[2]) C. Leithäuser und R. Pohl[3]) und W. Bieber[4]) hervor. E. Barkow[5]) und E. Pringal[6]) glaubten, daß auch Stickoxyde an der Bildung des blauen Nebels beteiligt seien. E. Barkow[7]) hielt es für wahrscheinlich, daß Ozon nicht nur in statu nascendi, sondern sogar gestandenes Ozon den Stickstoff zu oxydieren vermag Ebenfalls glaubte E. Pringal[8]) eine Oxydation von freiem Stickstoff durch fertiges Ozon in Gegenwart von Feuchtigkeit bewiesen zu haben. Die Versuche von E. Barkow und E. Pringal waren im hiesigen Physikalischen Institut ausgeführt worden. Da nun Herr Prof. F. Richarz[9]) die Annahme einer Oxydation des Stickstoffs durch fertiges Ozon für sehr unwahrscheinlich hielt, veranlaßte er W. Bieber Versuche anzustellen, welche entscheiden sollten, ob tatsächlich eine Oxydation des Stickstoffs durch fertiges Ozon, vielleicht unter Mitwirkung von Belichtung, stattfinden kann. W. Bieber[10]) gelingt es nachzuweisen, daß reines Ozon die Kondensation von Wasserdampf nicht begünstigt; daß ferner freier Stickstoff von stabilem Ozon in Gegenwart von Feuchtigkeit nicht oxydiert wird und daß weder Belichtung noch Verunreinigungen des Stickstoffs mit Stickoxyden eine solche Oxydation bewirken können.

W. Bieber[11]) findet als Resultat seiner Untersuchungen über die Kondensation von Wasserdampf in Gegenwart von Ozon, daß der in denselben Fällen schon von E. Barkow und E. Pringal beobachtete blaue Nebel nur auf der Bildung von

---

[1]) E. Barkow: Ann. d. Phys. 23 (1907) S. 336.
[2]) E. Pringal, Diss. Marburg 1908, S. 58.
[3]) C. Leithäuser und R. Pohl: Verh. d. D. Phys. Ges. 10 (1908) S. 253.
[4]) W. Bieber, Diss. Marburg 1911, S. 17—20.
[5]) E. Barkow: Ann. d. Phys. 23 (1907) S. 332.
[6]) E. Pringal, Diss. Marburg 1908, S. 50.
[7]) E. Barkow: Ann. d. Phys. 23 (1907) S. 332.
[8]) E. Pringal, Diss. Marburg 1908, S. 58.
[9]) F. Richarz, Über den wesentlichen Einfluß von Spuren nitroser Gase auf die Kondensation von Wasserdampf: Sitz.-Ber. d. Ges. z. Beförd. d. ges. Naturw. zu Marburg Nr. 4 v. 13. 5. 1908.
[10]) W. Bieber, Diss. Marburg 1911, S. 12 ff.
[11]) W. Bieber, Diss. Marburg 1911, S. 33—35.

Wasserstoffsuperoxyd beruht. Also wurde von W. Bieber die Vermutung von C. T. R. Wilson, der Wasserstoffsuperoxyd als die gelöste Substanz in dem blauen Nebel annahm, bestätigt. Wie konnte man sich nun die Wasserstoffsuperoxydkerne gerade durch Einfluß von Ozon entstanden denken? Daß Ozon selbst nicht der Träger des blauen Nebels war, hatten, wie schon erwähnt, Meißner, R. v. Helmholtz und F. Richarz, E. Barkow, E. Pringal, C. Leithäuser und R. Pohl nachgewiesen. Es mußte bei dem Zerfall von Ozon Wasserstoffsuperoxyd gebildet werden nach den einfachen Formeln:

einerseits $O_3 = O_2 + O$,

andererseits $O + H_2O = H_2O_2$.

3. Wirkung von ultraviolettem Licht.

Denselben blauen Nebel, wie er sich bei Einfluß von Ozon in statu nascendi auf die Kondensation von Wasserdampf zeigte, stellte W. Bieber[1]) auch bei Einwirkung von ultraviolettem Licht auf die Kondensation von Wasserdampf in Sauerstoff fest. Nach längerer Bestrahlung konnte W. Bieber ein Kondensationsprodukt erhalten, welches in der Tat Wasserstoffsuperoxydreaktionen aufwies. Unter dem Einfluß der ultravioletten Strahlen waren höchstwahrscheinlich die Sauerstoffmoleküle dissoziiert worden ($O_2 = O + O$), und es hatte sich einerseits Wasserstoffsuperoxyd ($H_2O + O = H_2O_2$), andererseits Ozon ($O_2 + O = O_3$) gebildet. Man kann nun als sehr wahrscheinlich annehmen, daß auch zum Teil dieses frisch entstandene Ozon unter Einwirkung der Strahlen wiederum zerfallen ist in ein Sauerstoffmolekül (O_2) und ein Sauerstoffatom (O), welches dann den Wasserdampf wiederum zu Wasserstoffsuperoxyd oxydiert hat. Die andere Möglichkeit, daß sich Wasserstoffsuperoxyd aus reinem Wasser gebildet hätte, etwa nach der Formel

$$2\,H_2O = H_2O_2 + H_2,$$

wäre nach den Versuchen von C. T. R. Wilson[2]) und Vincent[3])

---

[1]) W. Bieber, Diss. Marburg 1911, S. 33—35.

[2]) C. T. R. Wilson: Phil. Trans. London A. vol. 192 (1899) p. 403—453.

[3]) Vincent: Proc. of the Cambr. Phil. Soc. vol. 12 (1904) part. IV.

und Bieber[1]) in reinem Wasserdampf und reinem Wasserstoff, wo kein Nebel unterhalb der Ionengrenze auftritt, auszuschließen. Wenn nun W. Bieber mit Wasserdampf gesättigten Sauerstoff 20 Minuten lang mit der Quecksilberlampe belichtete, so trat der blaue Wasserstoffsuperoxydnebel freiwillig ein, ohne daß eine Übersättigung denselben erst hervorzurufen brauchte.

4. Einwirkung von Röntgenstrahlen.

W. Bieber[1]) versuchte dann auch durch Bestrahlung mit Röntgenstrahlen den blauen Wasserstoffsuperoxydnebel zu erhalten und fand, wie auch schon E. Barkow[2]) konstatiert hatte, nur eine erzwungene Nebelbildung (bei etwa 8 cm Druckerniedrigung). Es lag jedoch die Vermutung nahe, daß unter bestimmten Versuchsverhältnissen auch die Röntgenstrahlen entsprechend wie ultraviolettes Licht den blauen Wasserstoffsuperoxydnebel hervorrufen können, und daß die bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht erhaltene freiwillige Kondensation von Wasserdampf in Gegenwart von Luft oder Sauerstoff auch bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen eintritt. Bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht war W. Bieber der direkte chemische Nachweis von Wasserstoffsuperoxyd gelungen, obwohl wegen der geringen Mengen des Bestrahlungsproduktes der Nachweis Schwierigkeiten machte. Ganz aussichtslos schien dagegen der direkte chemische Nachweis von Wasserstoffsuperoxyd bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen, wo man mit noch kleineren Mengen von Wasserstoffsuperoxyd zu rechnen hatte. Man mußte deswegen einen anderen Weg einschlagen, um Wasserstoffsuperoxydbildung unter Einwirkung von Röntgenstrahlen nachzuweisen. Das nächstliegende Verfahren war, die einzelnen Gase bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen zu untersuchen und festzustellen, bei welchen Gasen Nebelbildung unterhalb der Ionengrenze eintritt und bei welchen nicht. Es war zunächst die Aufgabe von C. Leibfried, Versuche über Einwirkung von intensiven Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft

[1]) W. Bieber, Diss. Marburg 1911, S. 37.
[2]) E. Barkow, Diss. Marburg 1906, S. 24.

und Wasserstoff anzustellen. Bei Bestrahlung von Luft untersuchte C. Leibfried[1]) die Abhängigkeit der hervorgerufenen Kondensation von der speziellen Beschaffenheit der Röntgenstrahlen und fand, daß die weiche Strahlung, die zum Unterschied von der harten Strahlung allgemein als weniger durchdringend bekannt ist, Kondensationskerne erzeugt, die bei einer kleineren Übersättigung wirksamer sind als die der härteren Strahlen. Diese Abhängigkeit fand C. Leibfried, indem er die Röntgenstrahlen durch ein genügend starkes Metallblech hindurch gehen ließ, wodurch dann die weicheren Strahlen zurückgehalten wurden. Die niedrigste Kondensationsgrenze, welche er unter Einwirkung der Röntgenstrahlen erhielt, betrug 0,4 cm (Quecksilberdruck) Entspannung. Nach den Versuchen, welche C. Leibfried[1]) dann mit reinem Wasserstoff anstellte, bei welchen er keine Wirkung der Röntgenstrahlen unterhalb der Ionengrenze feststellen konnte, mußte man analog wie bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht die Bildung von Wasserstoffsuperoxydkernen annehmen, die die Kondensation unterhalb der Ionengrenze bedingten.

B. Veranlassung zur vorliegenden Arbeit.

Zur weiteren Prüfung der Annahme, daß Wasserstoffsuperoxyd auch den von Röntgenstrahlen in sauerstoffhaltigen Gasen bei Anwesenheit von Wasserdampf gebildeten Nebel unterhalb der Ionengrenze hervorruft, blieben nun nach C. Leibfrieds Versuchen noch die Fragen offen: Läßt sich bei genügend starker Intensität der Röntgenstrahlen eine freiwillige Kondensation von Wasserdampf erhalten, und welche Wirkung haben Röntgenstrahlen auf mit Wassderdampf gesättigten Sauerstoff und Stickstoff? Diese Fragen zu lösen, war das Ziel meiner Arbeit.

---

[1]) C. Leibfried, Diss. Marburg 1914, S. 15—18.

II. Versuchsanordnung.

1. Erklärung der Entspannungsapparatur.

Zur Untersuchung der Kondensationserscheinungen wurde die Methode der adiabatischen Entspannung benutzt. Der verwendete Entspannungsapparat (Figur 1 auf Figurentafel am Schluß) ist im Prinzip derselbe Apparat, wie ihn C. T. R. Wilson[1]) zuerst zu seinen Kondensationsuntersuchungen benutzt hat. Die beiden Hauptbestandteile der Apparatur sind das Kondensationsgefäß A von etwa 16 cm Durchmesser, das zur Hälfte mit abgekochtem destillierten Wasser gefüllt ist, und das Gefäß B, in welchem sich ein Glaskolben C auf und ab bewegen läßt. Beide Gefäße sind durch eine Glasröhre q von ca. 2 cm Durchmesser miteinander verbunden. Das Nebelgefäß A trägt einen eingeschliffenen Glasstopfen mit Quecksilberdichtung, in welchem noch 2 Glasröhren o und p außer dem Zuleitungsrohr q eingeschmolzen sind. Das Glasrohr o dient zum Ableiten des im Nebelgefäß vorhandenen Gases, und durch das Glasrohr p kann das im Nebelgefäß befindliche Wasser abgelassen bezw. erneuert werden. Gegen das Volumen von A und B ist das Innere des Kolbens C durch Quecksilber, über dem sich noch eine Schicht abgekochten destillierten Wassers befindet, abgeschlossen. Das Innere des Kolbens C kann durch die oben verbreiterte Röhre D mit einer Vakuumeinrichtung (Figur 2) in Verbindung gesetzt werden. Die obere tellerförmige Ausbauchung des Rohres D dient gleichzeitig zur Führung des beweglichen Glaskolbens C. Die Verschlußvorrichtung bei E schließt für gewöhnlich das Innere des Kolbens C gegen das Vakuum ab, indem ein an einer Messingstange mit Handgriff e befestigter Gummistopfen k durch den Druck einer Feder gegen die gut abgeschliffene Öffnung bei n gepreßt wird. Die Stange mit dem Handgriff e ist luftdicht durch einen Schlauchüberzug bei r in das Umfassungsrohr eingeführt. Wird der Gummistopfen durch den Handgriff e zurückgezogen, so ist die Verbindung der Röhre D mit dem Vakuum hergestellt. Das Innere des Kolbens C läßt sich ferner auch

[1]) C. T. R. Wilson: Phil. Trans. London A. vol. 192 (1899) p. 405.

noch mit der freien Atmosphäre durch Öffnen des Hahnes 2 verbinden. Angenommen, es herrscht in A und B Atmosphärendruck und das Volumen innerhalb des Kolbens C ist bei Abschluß gegen das Vakuum durch den Hahn 2 mit der Atmosphäre verbunden, so wird sich der Auftrieb des Quecksilbers auf den darin schwimmenden Glaskolben geltend machen, und derselbe wird in dem Quecksilber bis zu einer bestimmten Stelle gehoben. Nun werde der Hahn 2 geschlossen und der Vakuumverschluß durch Zurückziehen von e geöffnet; dann wird der Kolben C sofort mit großer Geschwindigkeit gegen den Boden des Gefäßes B, welcher durch einen Gummistopfen m gebildet wird, heruntergedrückt. Infolgedessen tritt in dem Raum B und dem Gefäß A, welche vorher durch die Hähne bei 1′ und 4 gegen die Außenluft abgeschlossen waren, eine adiabatische Entspannung von bestimmter Größe ein. Durch Öffnung von Hahn 2 wird nun im Inneren des Kolbens C wieder Atmosphärendruck hergestellt, der Kolben C hebt sich wieder, und es kann eine neue Entspannung im Beobachtungsgefäß vorgenommen werden. Damit nun das Herabsinken des Kolbens C und damit die Entspannung in A möglichst plötzlich vor sich geht, muß das Innere des Kolbens C durch genügend weite Röhren mit dem Vakuum verbunden sein. Eine gewöhnliche Hahnverbindung mit dem Vakuum konnte den Anforderungen nicht genügen; die oben beschriebene Verschlußvorrichtung bei E, welche auch schon von C. T. R. Wilson in ähnlicher Ausführung verwendet wurde, bewährte sich dagegen vorzüglich. Als besonders wichtig für ein gutes und immer gleichbleibendes Funktionieren der Entspannungsvornahme ist noch zu erwähnen, daß der Kolben C am unteren Rand gut eben geschliffen ist, so daß er sich fest auf den Gummistopfen m preßt. Auch ist die Einschnürung der Röhre D bei a wesentlich. Bei einem ersten Versuch, als das Rohr D noch durchweg einen Durchmesser hatte, wie ihn die tellerförmige obere Verbreiterung in Figur 1 hat, spritzte das Quecksilber bei einer Entspannung in das Rohr D hinein. Infolgedessen konnten nie hintereinander Entspannungen von zuverlässig derselben Größe vorgenommen werden. Bei der späteren Einrichtung war aber für eine der Größe nach vorher bestimmbare Entspannung garan-

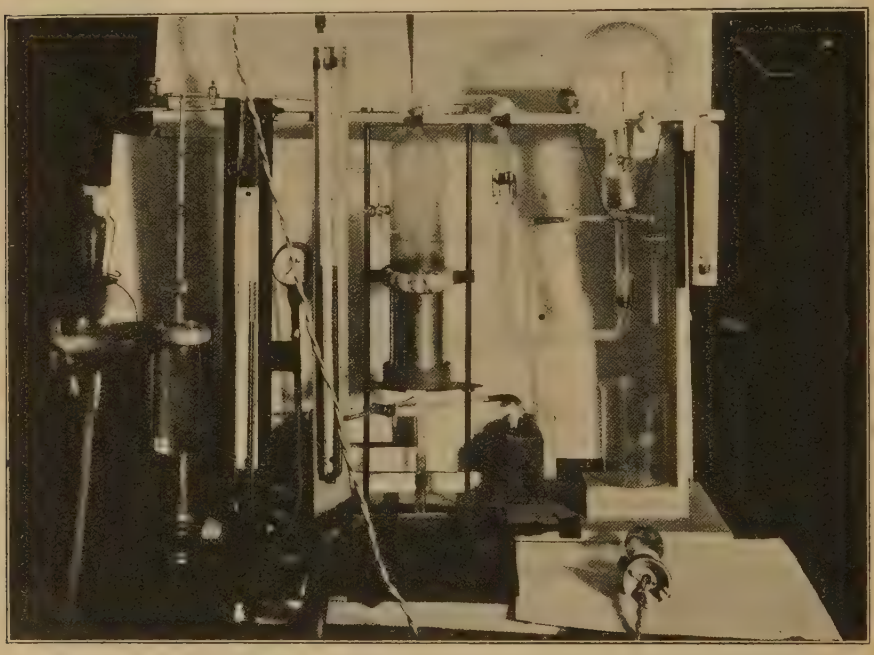
tiert. Um die Größe der ausgeführten Entspannung abzulesen, läßt sich das Volumen von B und A durch Öffnen des Hahnes 4 mit dem Manometer f verbinden. Zwecks Einstellung der Apparatur auf bestimmte Entspannungsgröße ist hinter dem Manometer f noch eine Vorrichtung angebracht, welche gestattete, in B und A den Druck zu verändern. Sie besteht aus zwei zum Teil mit Quecksilber gefüllten Gefäßen, welche durch einen Druckschlauch verbunden sind. Je niedriger der bewegliche Teil x bei geschlossenen Hähnen 1, 1′ und 2 steht, um so tiefer sinkt das Quecksilber in g, um so größer wird der in A und B sich herstellende Unterdruck. Sind z. B. die Hähne 1′ und 1 geschlossen, ferner die Hähne 3 und 4 geöffnet, so kann bei heruntergedrücktem Kolben durch Einstellen von x in A und B jeder beliebige Unterdruck hergestellt werden, dessen Maximum[1]) natürlich von den Volumenverhältnissen der Apparatur abhängig ist. Die Größe des Unterdrucks ist an dem Manometer f abzulesen. Das Manometer gebe z. B. einen Unterdruck von 10 cm an. Nun werde Hahn 4 geschlossen und Hahn 2 geöffnet, so daß also das Innere des Kolbens C mit der Atmosphäre in Verbindung steht; dann wird der Kolben C soweit steigen, bis der Druck in A und B auch auf Atmosphärendruck angewachen ist. Jetzt werde Hahn 2 geschlossen und der Vakuumverschluß E geöffnet. Sofort tritt in A eine Entspannung von 10 cm ein, wie sie vorher am Manometer abzulesen war, und wie sie nun nochmals kontrolliert werden kann. So konnte durch Einstellen von g jede beliebige Entspannung hergestellt werden, deren Maximum von den Volumenverhältnissen der Apparatur abhängt. Die höchste Entspannung, die mit der Apparatur ausgeführt werden konnte, betrug 17 cm, was für meine Zwecke genügte, da ja nur die Kondensationserscheinungen unterhalb der Ionengrenze von 15 cm zu untersuchen waren. Folgende Abbildung gibt noch einmal ein übersichtliches Bild über die benutzte Entspannungsapparatur und deren Anordnung.

---

[1]) Bei Erreichung der Maximumstellung des Kolbens C mußte darauf geachtet werden, daß das untere Ende desselben noch ziemlich weit in Quecksilber tauchte; dementsprechend mußte die Quecksilbermenge in B gewählt werden.

2. Die Vakuumeinrichtung.

Die Vakuumeinrichtung, welche das Herabziehen des Kolbens C und somit die Entspannung im Nebelgefäß ermöglichen sollte, ist im Prinzip dieselbe, wie sie von C. Leibfried[1]) im hiesigen Physikalischen Institut zu Versuchen benutzt worden ist. Sie besteht im wesentlichen aus 2 Teilen, einem Hauptvakuum, umfassend 6 große Kugelballons, und aus einem Vorvakuum, einem



Glasballon von etwa 35 cm Durchmesser. Hauptvakuum sowie Vorvakuum sind mit je einem Manometer versehen, an denen der Unterdruck abgelesen werden kann. Die Anordnung von Haupt- und Vorvakuumgefäßen ist am Schluß auf der Figurentafel (Figur 2) zu ersehen. Bei den Versuchen wird zunächst das Hauptvakuum durch eine Wasserstrahlpumpe bis auf etwa 50 cm Unterdruck, abzulesen am Manometer 2, ausgepumpt, während der Hahn 3 geschlossen ist. Durch Öffnen des Hahnes 3

[1]) C. Leibfried, Diss. Marburg 1914, S. 11.

läßt sich nun jeder beliebige Unterdruck, wie er eben zum möglichst schnellen Herabsinken des Kolbens C (s. Figur 1) nötig ist, im Vorvakuum herstellen. Den Unterdruck im Vorvakuum zeigt das Metallmanometer 1 an. Auf diese Weise konnte für mehrere Versuche der Druck im Vorvakuum durch das Hauptvakuum reguliert werden, ohne daß die Wasserstrahlpumpe nach jedem Versuch in Tätigkeit gesetzt zu werden brauchte.

3. Vorteile der Apparatur.

Der Vorteil der oben beschriebenen Entspannungsapparatur läßt sich sofort erkennen, wenn man sie den bisher am meisten benutzten Apparaturen gegenüberstellt. Bei den letzteren ist das Nebelgefäß direkt mit dem Vakuum verbunden. Infolgedessen muß nach einmaliger Entspannung des betreffenden Gasvolumens wieder solange Gas zugeleitet werden, bis sich Atmosphärendruck im Kondensationsgefäß wieder hergestellt hat. Bei der hier verwendeten Apparatur (Figur 1) ist das Kondensationsgefäß A von dem Vorvakuum durch den beweglichen Glaskolben C, der in Quecksilber taucht, getrennt. Infolgedessen ist der Nachteil, nach jeder Entspannung neues Gas einleiten zu müssen, vermieden. Das zu untersuchende Gas wird einmal in die Apparatur eingeleitet, dann durch Schließen der beiden Hähne 1 und 1′ (s. Figur 1) gegen die Außenluft abgeschlossen, und die Entspannungen können beliebig oft mit demselben Gasvolumen vorgenommen werden. Daher konnten die einzelnen Versuche schnell nacheinander gemacht werden, nachdem in die Apparatur einmal reines Gas eingeleitet war. Die nach jedem Versuch unterhalb der Ionengrenze (15 cm) vorhandenen Nebeltröpfchen konnten durch eine genügende Anzahl von Entspannungen von etwa 14 cm wieder beseitigt werden, indem sie sich setzten und vom Absperrwasser aufgenommen wurden. Als Beleuchtungsquelle zur Beobachtung der im Nebelgefäß auftretenden Nebel diente eine in einem Blechkasten eingebaute Bogenlampe, deren Licht mittels eines Kondensors in das Nebelgefäß geworfen wurde. Bei diesem intensiven Licht war im Nebelgefäß die feinste Nebelbildung zu beobachten.

III. Versuche.

A. Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Kondensation von Wasserdampf in Luft.

1. Die Art der Reinigung ist ohne Einfluß.

Zunächst wurde zu den Versuchen Luft verwendet, welche über Chlorkalzium und Watte in langen Röhren gestrichen war. Das Chlorkalzium sollte auch die feinsten an Kernen hygroskopischer Natur gebildeten Tröpfchen zurückhalten, während weiter die Wattefilter die Luft von Staubteilchen und Chlorkalziumteilchen befreit. Es entstand die Frage, ob in dieser Weise wirklich alle Kerne entfernt worden waren. Nachdem einige Zeit derartig gereinigte Luft durch die Apparatur geleitet war, zeigte sich nach wenigen Entspannungen bis zur Ionengrenze keine Kondensation mehr. Mit dieser gereinigten Luft wurden nun Bestrahlungsversuche mit Röntgenstrahlen angestellt. Sehr bald zeigte sich, daß schon bei Entspannungen unterhalb der Ionengrenze wieder Kondensation eintrat. Bei anderen Versuchen wurde auch gewöhnliche Zimmerluft in das Kondensationsgefäß ohne Filtration geleitet und nun durch wiederholte Entspannungen mit folgendem Sichsetzenlassen des Nebels gereinigt, bis keine Kondensation mehr eintrat. Auch hier trat dann erst nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlen eine starke Nebelbildung auf bei Entspannungen schon unterhalb der Ionengrenze. Hieraus ist erkennbar, daß die Art der Reinigung, Filtration oder wiederholten Niederschlagen, keinen Einfluß auf die Kondensation von Wasserdampf unterhalb der Ionengrenze hat.

2. Abhängigkeit der Kondensationsgrenze von der Bestrahlungsdauer.

Nun wurde systematisch der Einfluß der Dauer der Röntgenstrahlung und der Härte der Strahlung auf die Bildung von Kondensationskernen untersucht, welche bei Entspannungen unterhalb der Ionengrenze Kondensation zeigten. Zur Benutzung gelangte eine Röntgenröhre stärkster Konstruktion für Dauer-

belastung,[1]) welche in einem mit 1 mm starken Blei ausgeschlagenen Kasten, der gut geerdet war, über dem Nebelgefäß angebracht wurde. Um eine kräftige Wirkung der Röntgenstrahlen zu bekommen, war der Abstand der Röntgenröhre vom Nebelgefäß möglichst klein gemacht, etwa 0,2—0,4 cm. Ferner wurde die Röntgenröhre auf große Weichheit[2]) eingestellt, da nach den Versuchen von C. Leibfried die weichen Röntgenstrahlen die chemisch wirksamen sind. Für die verschiedenen Bestrahlungszeiten sollte nun die Kondensationsgrenze festgestellt werden. Diese Kondensationsgrenze ist dadurch charakterisiert, daß bei einer um $^1/_2$ cm kleineren Entspannung nicht einmal mehr einzelne Tröpfchen auftreten, bei einer um $^1/_2$ cm größeren Entspannung dagegen sich schon eine solche Kondensation bemerkbar macht, welche mit dem Ausdruck „Nebel" zu bezeichnen ist. Bei dem ersten Versuch eine Tabelle für die Abhängigkeit der Kondensationsgrenze von der Bestrahlungsdauer, wie sie von C. Leibfried aufgestellt worden war, aufzustellen, bekam ich täglich verschiedene Resultate für dieselbe Bestrahlungszeit. Das hatte, wie sich bald herausstellte, seinen Grund in der nicht konstant bleibenden Wirkung der Röntgenapparatur. Der Grund hierfür konnte liegen 1. in der Röntgenröhre selbst, 2. im Induktorium und Wehneltunterbrecher und 3. in der schwankenden primären Stromstärke. Deswegen wurde die Weichheit der Röhre möglichst

---

[1]) Intensivstrom-Röntgenröhre mit Luftkühlung von Gundelach-Gehlberg-Thüringen.

[2]) Erklärung der Regeneriervorrichtung zum Herstellen von weichen Strahlen. An den Röntgenröhren neuerer Konstruktion ist eine Vorrichtung angebracht, welche es ermöglicht, dieselbe auf jeden gewünschten Härtegrad einzustellen. Ohne diese Regeneriervorrichtung wurden die Röntgenröhren früherer Konstruktionen meist nach längerem Gebrauch hart, weil das in der Röhre befindliche Gas zum Teil verbraucht und somit ein zu sehr verdünnter Raum in der Röhre entstanden war. In der obengenannten Vorrichtung ist nun eine gasabscheidende Substanz angebracht, welche bei Betätigung einer der Röntgenröhre parallel geschalteten Funkenstrecke Gas abscheidet und die sonst eintretende Gasverdünnung oder das Hartwerden der Strahlen verhindert. Je kleiner nun die Funkenstrecke gewählt wird, um so mehr Gas wird abgeschieden, um so weicher und um so stärker absorbierbar sind die Strahlen.

konstant gehalten, indem die Nebenfunkenstrecke auf bestimmte Funkenlänge eingestellt wurde. Zur Kontrolle einer konstant zu haltenden Stromstärke im Primärkreis des verwendeten Induktoriums von 35 cm Schlagweite wurde in diesem Stromkreis ein Amperemeter eingeschaltet. Der Wehneltunterbrecher wurde auf eine möglichst günstige Unterbrechungszahl einreguliert. Mit Hilfe von kontinuierlich veränderlichen Widerständen wurde dann bei langer Bestrahlungszeit, während welcher sich der Widerstand im Induktorium infolge Erwärmung änderte, die Stromstärke möglichst auf dem konstanten Wert gehalten. Bei einer konstanten primären Stromstärke von 12 Ampere, welche sich bei der vorhandenen Apparatur und der zur Verfügung stehenden Akkumulatorenbatterie am besten einhalten ließ, wurden nun die ersten Versuche über die Abhängigkeit der Kondensationsgrenze von der Bestrahlungszeit angestellt. Die Werte, welche für die untere Kondensationsgrenze für verschiedene Bestrahlungszeiten erhalten wurden, sind in Tabellen I bis IV wiedergegeben.

3. Erniedrigung der Kondensationsgrenze durch Bestrahlung mit Röntgenstrahlen bis zur freiwilligen Kondensation.

Wie Tabelle I zeigt, wird die Kondensationsgrenze bei zunehmender Bestrahlungsdauer immer mehr heruntergesetzt; bei einer Bestrahlungsdauer von 8 Minuten tritt sogar eine freiwillige Kondensation ein. Nach Verlauf dieser Bestrahlungszeit waren zunächst einzelne gut sichtbare Tropfen zu beobachten;

Tabelle I.

Bestrahlung ohne Cu-Blech

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
8 Sek.	1,7 cm
15 „	1,2 „
30 „	0,8 „
1 Min.	0,4 „
2 „	0,4 „
3 „	0,4 „
8 „	freiwillige Kondensation

Tabelle II.

Bestrahlung mit Cu-Blech 0,05 mm

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
1 Min.	zwischen 7 und 6 cm
2 „	„ 6 „ 5 „
3 „	„ 5 „ 4 „
4 „	„ 4 „ 3 „
5 „	„ 3 „ 2 „
6 „	„ 3 „ 2 „
10 „	„ 2 „ 1 „
25 „	„ 1 „ 0 „
47 „	„ 1 „ 0 „
3 Stunden[1])	„ 0,1 „ 0,2 „

Tabelle III.

Bestrahlung mit Cu-Blech 0,09 mm

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
1 Min.	zwischen 9 und 8 cm
2 „	„ 8 „ 7 „
3 „	„ 7 „ 6 „
4 „	„ 6 „ 5 „
5 „	„ 5 „ 4 „
6 „	„ 4 „ 3 „
7 „	„ 4 „ 3 „
8 „	„ 4 „ 3 „
15 „	„ 3 „ 2 „

Tabelle IV.

Bestrahlung mit Cu-Blech 0,14 mm

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
1 Min.	zwischen 12,5 und 11,5 cm
2 „	„ 10,5 „ 9,5 „
3 „	„ 7,5 „ 6,5 „
4 „	„ 6,5 „ 5,5 „
5 „	„ 6,5 „ 5,5 „
6 „	„ 5,5 „ 4,5 „
7 „	„ 4,5 „ 3,5 „
15 „	„ 3,5 „ 2,5 „

[1]) Diese lange Bestrahlung von 3 Stunden war natürlich nur möglich bei Zwischenpausen von 10—15 Minuten.

wurde jetzt die Bestrahlung noch weiter fortgesetzt, so trat eine Vermehrung der Tropfen auf, welche regenförmig herabfielen. Nunmehr wurde eine Reihe von Untersuchungen angestellt, welche den schon von E. Leibfried gefundenen Einfluß der Härte der Strahlen auf die Kondensationsgrenze bestätigen sollten. Es wurden daher nacheinander Kupferbleche von 0,05 mm bezw. 0,09 mm, bezw. 0,14 mm Dicke zwischen Röntgenröhre und Nebelgefäß gebracht, während die Intensität der Strahlung dieselbe wie vorher war (12 Ampere). Aus den Tabellen II—IV geht nun deutlich hervor, daß je mehr die weichen Strahlen durch die Kupferbleche zurückgehalten werden, die Kondensationsgrenze um so weniger herabgesetzt wird. Zwar erniedrigt längere Bestrahlungszeit selbst bei Filter von 0,14 mm Dicke die Kondensationsgrenze noch beträchtlich, jedoch ist nun eine freiwillige Kondensation nicht mehr zu erreichen. Schon bei dem nur 0,05 mm dicken Kupferfilter bleibt bei $^3/_4$ stündiger Bestrahlungszeit die freiwillige Kondensation aus.

4. Abhängigkeit der freiwilligen Kondensation von der Intensität der Strahlen.

Interessant war nun auch die Frage, ob die Intensität der Röntgenstrahlung neben der Weichheit der Strahlung eine Rolle bei der Erniedrigung der Kondensationsgrenze spielt. Es wurde daher nunmehr das Funkeninduktorium bei einer Reihe von Versuchen mit verschiedener primärer Stromstärke betrieben und jeweilig das Eintreten der freiwilligen Kondensation beobachtet.

Tabelle V.

Bestrahlungszeit	Kondensation	Stromstärke Ampere
3,5 Min.	freiwillig	13
8 „	„	12
11,5 „	„	$11^1/_2$
16 „	„	11

Tabelle V zeigt das Resultat dieser Versuche. Je größer die Intensität der Strahlung ist, um so früher tritt die freiwillige Kondensation auf. Bei der primären Stromstärke von 13 Ampere wird die freiwillige Kondensation nach $3^1/_2$ Minuten eingeleitet.

Wurde bei dieser Stromstärke wiederum das Kupferfilter von 0,05 mm Stärke in den Strahlengang gebracht, so war selbst bei einer Bestrahlungsdauer von 30 Minuten keine freiwillige Kondensation zu beobachten. Bei den vorbeschriebenen Versuchen war nun die Regeneriervorrichtung der benutzten Röntgenröhre unbrauchbar geworden. Infolgedessen wurde nun die Röhre zu schnell hart und die Wirkung auf die Kondensation von Wasserdampf minimal. Da nun eine neue Röntgenröhre derselben Bauart in Benutzung genommen wurde, mußten, um den Anschluß an die vorigen Versuche zu erreichen, dieselben zum Teil noch einmal wiederholt werden. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle Ia und IIa. Die Versuche, wie sie oben beschrieben sind, waren

Tabelle Ia.

Bestrahlung ohne Cu-Blech

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
1 Sek.	zwischen 12 und 11 cm
2 „	„ 11 „ 10 „
5 „	„ 9 „ 8 „
1 Min.	„ 5 „ 4 „
2 „	„ 3 „ 2 „
5 „	„ 1 „ 0 „
12 „	freiwillige Kondensation

Tabelle IIa.

Bestrahlung mit Cu-Blech 0,05 mm

bei 12 Amp. Primärstromstärke.

Bestrahlungszeit	Expansion
1 Sek.	nichts unterhalb 15 cm
2 „	zwischen 15 und 14 „
5 „	„ 15 „ 14 „
10 „	„ 15 „ 14 „
20 „	„ 14 „ 13 „
30 „	„ 13 „ 12 „
40 „	„ 12 „ 11 „
45 „	„ 12 „ 11 „
1 Min.	„ 11 „ 10 „
2 „	„ 8 „ 7 „
4 „	„ 6 „ 5,5 „
6 „	„ 4,5 „ 4 „

mit der alten Röhre mehrmals nachgeprüft worden; immer hatten sich dieselben Resultate, wie sie in den Tabellen I—IV dargestellt sind, quantitativ ergeben. Bei den Versuchen mit der neuen Röhre zeigte sich, daß sich mit ihr unter denselben Versuchsbedingungen immer dieselben Werte für die Erniedrigung der Kondensationsgrenze ergaben; jedoch war die Wirkung im ganzen eine etwas geringere. So trat bei einer primären Stromstärke von 12 Ampere die freiwillige Kondensation erst nach 12 Minuten auf, während sie bei der alten Röhre schon mit 8 Minuten sichtbar wurde. Offenbar ist der Nutzeffekt der neuen Röhre nicht ein gleichguter wie bei der alten Röhre. Die bei der Bestrahlung von Luft mit Röntgenstrahlen erhaltenen Resultate über die Erniedrigung der Kondensationsgrenze bis zur auftretenden freiwilligen Kondensation, wie sie in den Tabellen I bis V und Ia und IIa in ihrer Abhängigkeit von der Intensität und Härte der Strahlung angegeben sind, sind zwecks einer besseren Vergleichsmöglichkeit in den Figuren 1—4 (s. Kurventafel) graphisch dargestellt. In den so erhaltenen Kurven 1—3 ist die Ionengrenze von 15 cm Entspannung (auf den Kurventafeln mit dem Zeichen ×) als ungezwungener Anfangswert für die Bestrahlungsdauer Null zu betrachten. Figur 1 zeigt die Abhängigkeit der Erniedrigung der Kondensationsgrenze bei konstanter Weichheit und Intensität der Strahlung von der Bestrahlungsdauer für die Versuche mit den beiden verschiedenen Röntgenröhren: Die Ordinate enthält die Bestrahlungszeit, die Abszisse die Größe der Entspannung, bei welcher die erste Kondensation auftritt. Der Unterschied in dem Nutzeffekt der Röhre ist gut erkennbar. Die Schnittpunkte der Kurven mit den Ordinaten bezeichnen das Eintreten der freiwilligen Kondensation. Die Figuren 2 und 3 (s. Kurventafel) lassen in graphischer Darstellung den Einfluß der Bestrahlungszeit auf die Erniedrigung der Kondensationsgrenze bei zwischengeschalteten Kupferblechen verschiedener Dicke erkennen. Figur 2 gibt die mit der Röhre I erhaltenen Resultate, entsprechend Tabellen II, III und IV, wieder, Figur 3 die mit der Röhre II erhaltenen Resultate, entsprechend Tabelle IIa. In der Kurve 4a ist die Abhängigkeit der für das Eintreten der freiwilligen Kondensation erforderlichen Bestrah-

lungszeit bei der Einwirkung der Röntgenstrahlen auf Luft dargestellt. Als Abszissen sind die Bestrahlungszeiten in Minuten und als Ordinaten die Stromstärken im Primärkreis des Induktoriums aufgetragen. Man sieht auch hier, daß mit zunehmender Intensität der Strahlung die für das Eintreten der freiwilligen Kondensation erforderliche Bestrahlungszeit schnell kleiner wird.

B. Versuche mit Sauerstoff.

1. Darstellung.

Der Sauerstoff wurde dargestellt durch elektrolytische Zersetzung von Schwefelsäure mittels Platinelektroden in einem Apparat der allgemein üblichen Form, wie er schon mehrfach im hiesigen Physikalischen Institut zur Gewinnung von Sauerstoff gebraucht wurde (vgl. Diss. Bieber). Zur Beseitigung der mitgeführten Feuchtigkeit wurde das Gas durch konzentrierte Schwefelsäure und danach über Natronkalk geleitet, dann zur Oxydation der möglicherweise vorhandenen Spuren von Wasserstoff über glühendes Kupferoxyd geleitet und endlich in einem Pettenkoferschen Rohr, das abgekochtes destilliertes Wasser enthielt, mit Wasserdampf gesättigt. Die in der ganzen Versuchsapparatur vorhandene Luft wurde durch genügend langes Durchleiten von Sauerstoff beseitigt, bis alle Luft aus dem Apparate verdrängt war. Damit nun der Gasstrom möglichst glatt durch die Apparatur hindurchging und wirklich alle Luft verdrängte, mußten alle Röhrenverzweigungen, aus welchen die Luft durch einfache Gasspülung nicht einfach entfernt werden konnte, durch Sperrflüssigkeit vorübergehend ausgefüllt werden. Zu dem Zwecke wurde das Quecksilber mit dem destillierten Wasser in der Einstellvorrichtung g und dem Manometer f (Figur 1) so weit emporgedrückt, daß sich keine Luft mehr in den Ansatzstücken befand. Ebenfalls konnte in dem Gefäß B der schädliche Raum um den Kolben C durch genügende Flüssigkeitsmengen von Quecksilber und destilliertem Wasser vermieden werden. Daß reiner Sauerstoff in der Versuchsapparatur war, konnte durch chemische Reaktion mittels Pyrogallol und Kalihydrat[1]) nach-

[1]) Travers, Experim. Untersuchung von Gasen, Braunschweig 1905, S. 83.

gewiesen werden. Mit diesem Flüssigkeitsgemisch, von dem sicher nachgewiesen ist, daß aller mit ihm in Berührung kommender Sauerstoff absorbiert wird, wurde eine Zweikugelgaspipette gefüllt und eine bestimmte Menge des aus der Versuchsapparatur abfließenden Gases mit diesem Flüssigkeitsgemisch in Berührung gebracht. Bei Schütteln der Pipette wurde diese zugeführte Gasmenge vollkommen absorbiert. Der verwendete Sauerstoff war also vollkommen rein.

2. Resultate bei Bestrahlung von Sauerstoff.

a) Erniedrigung der Kondensationsgrenze.

Ließ ich nun Röntgenstrahlen auf den mit Wasserdampf gesättigten Sauerstoff einwirken, so konnten entsprechende Resultate wie bei Bestrahlung von Luft festgestellt werden. Die Kondensationsgrenze wurde bei vermehrter Bestrahlungsdauer erniedrigt, und zwar wieder bis zur freiwilligen Kondensation.

b) Die Wirkung ist stärker als bei Luft.

Jedoch war bei Bestrahlung von Sauerstoff, wie erwartet, die Einwirkung eine bedeutend verstärkte. Die folgende Tabelle VI

Tabelle VI.

Bestrahlungszeit	Kondensation	Stromstärke
$7^1/_2$ Min.	freiwillig	11 Ampere
$4^3/_4$ „	„	$11^1/_2$ „
$2^1/_2$ „	„	12 „
$1^1/_2$ „	„	$12^1/_2$ „

gibt die Abhängigkeit der zum Auftreten der freiwilligen Kondensation erforderlichen Bestrahlungszeit bei verschiedener Intensität der Röntgenstrahlung. Bei einer Stromstärke im Primärkreis des Induktoriums von 11 Ampere trat die freiwillige Kondensation nach einer Bestrahlungsdauer von $7^1/_2$ Minuten ein, bei einer Stromstärke von $12^1/_2$ Ampere sogar schon nach einer Bestrahlungszeit von nur $1^1/_2$ Minuten. Diese Resultate sind in der Kurve b der Figur 4 graphisch dargestellt. Ein Vergleich der Tabellen V u. VI und der beiden Kurven a u. b in

Figur 4 (s. Kurventafel) zeigt deutlich, wieviel stärker die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf die Kondensation des Wasserdampfes in Sauerstoff als in Luft bei denselben Versuchsbedingungen ist.

3. Der von Röntgenstrahlen in Luft und Sauerstoff gebildete Nebel.

Die Stärke der nebelartigen Kondensation, die Größe der einzelnen Nebeltröpfchen war von den Kondensationserscheinungen, wie sie bei Bestrahlung von Luft erhalten waren, verschieden. Bei Luft konnte wohl beim Eintreten der freiwilligen Kondensation immer eine regenartige Kondensation von Wasserdampf beobachtet werden, also jedes einzelne Nebeltröpfchen wegen seiner sichtbaren Größe erkannt werden. Bei Sauerstoff dagegen waren die einzelnen Nebeltröpfchen im Nebel kaum noch deutlich zu erkennen. Ich konnte bei der Feinheit der Nebeltröpfchen nur eine starke wolkenartige Kondensation feststellen. Dieser bei Sauerstoff auftretende freiwillige Nebel zeigte eine blaue Färbung, wie sie für die schon früher von E. Barkow, E. Pringal und W. Bieber beobachteten blauen Nebel, welche Wasserstoffsuperoxyd als Kerne haben, charakteristisch ist. Die Tröpfchen sind sehr fein und haben eine lange Lebensdauer. War bei der Bestrahlung von Luft und Sauerstoff noch keine freiwillige Nebelbildung aufgetreten, so konnte, wie oben gezeigt ist, eine erzwungene Kondensation mit einer Entspannung unterhalb 15 cm hervorgerufen werden. Wurde die Entspannung so hoch bemessen, daß eine dichte Nebelbildung eintrat, so hatte auch dieser Nebel eine blaue Färbuung. Auch diese Kerne waren sehr beständig, wie folgender Versuch zeigte. Wurde bei Luft und Sauerstoff bestrahlt und dann das Gefäß ohne Entspannungsvornahme sich selbst überlassen, so zeigte sich selbst noch nach 2 Tagen bei einer vorgenommenen Entspannung die Bildung des blauen Nebels in einer Feinheit und Färbung, wie er eben auch hier für Wasserstoffsuperoxydnebel charakteristisch ist.

C. Versuche mit Stickstoff.

Nach den Versuchen mit Luft und Sauerstoff war es höchst wahrscheinlich, daß Wasserstoffsuperoxyd unter Einwirkung der

Röntgenstrahlen gebildet wurde. Um nun zu entscheiden, ob nur die von Röntgenstrahlen gebildeten Wasserstoffsuperoxydkerne den Nebel unterhalb der Ionengrenze hervorriefen, wurden nun Versuche mit reinem Stickstoff angestellt, einem Gase, in welchem keine Wasserstoffsuperoxydbildung unter Einwirkung der Röntgenstrahlen anzunehmen war.

1. Darstellung.

Zur Darstellung des Stickstoffs wurde barytfreies Ammoniumnitrit benutzt. Zum Zurückhalten von Wasserdampf leitete ich das durch Erhitzen der genannten Flüssigkeit erhaltene Gas durch ein Wasserkühlrohr und Natronkalk und zum Vernichten von Stickoxyden durch Ferrochloridlösung, 30 %ige Kalilauge und schließlich durch ein glühendes Kupferrohr, das mit Kupferwolle angefüllt war. Das so präparierte Gas ließ ich zuletzt durch abgekochtes destilliertes Wasser in einem Pettenkoferschen Rohr langsam hindurchperlen, um den Stickstoff mit Wasserdampf zu sättigen. Um den von den vorhergehenden Versuchen in der Versuchsapparatur vorhandenen Sauerstoff durch den Sticktoffstrom vollständig zu verdrängen, wurde der Stickstoff 24 Stunden langsam durch die Apparatur hindurchgeleitet, und ich konnte nach den früheren Erfahrungen bei der Einleitung von Sauerstoff ganz sicher sein, daß der vorher vorhandene Sauerstoff vollkommen verdrängt war.

2. Resultate bei der Bestrahlung von Stickstoff mit Röntgenstrahlen.

Als nun die Röntgenstrahlen unter denselben Versuchsverhältnissen wie bei Luft und Sauerstoff auf den mit Wasserdampf gesättigten Stickstoff einwirkten, konnte selbst bei 30 Minuten langer Bestrahlung keine Bildung von Kernen festgestellt werden, welche unterhalb der Ionengrenze kondensierend wirkten. Bei einer Entspannung von 15 cm und mehr trat natürlich der gewöhnliche Ionennebel nach der langen Bestrahlungszeit von 30 Minuten, während welcher sich eine große Anzahl Ionen gebildet hatte, in verstärktem Maße auf.

IV. Zusammenfassung und Diskussion der Resultate.

Die Versuche ergaben kurz zusammengefaßt folgendes: 1. Bei Bestrahlung von kernfreier Luft und Sauerstoff mit Röntgenstrahlen tritt eine erzwungene Kondensation bereits unterhalb der Ionengrenze auf; die Erniedrigung der Kondensationsgrenze ist abhängig von der Dauer der Bestrahlung, von der Intensität der Strahlung, von der Weichheit der Strahlung. Bei genügender Intensität und Weichheit der Strahlung kann eine freiwillige Kondensation hervorgerufen werden. Der Einfluß der Bestrahlung ist sowohl auf Bezug der Erniedrigung der Kondensationsgrenze als auf das Eintreten der freiwilligen Kondensation stärker bei Sauerstoff als bei Luft. Die auftretenden Nebel zeigen die charakteristische Eigenschaft des blauen Nebels, welcher Wasserstoffsuperoxyd als Kernsubstanz enthält. 2. Bei Bestrahlung von reinem Stickstoff mit Röntgenstrahlen tritt keine Erniedrigung der Kondensationsgrenze, selbst bei Bestrahlungszeit bis zu 30 Minuten, ein.

V. Folgerungen aus den Resultaten über die Natur der unterhalb der Ionengrenze auftretenden Nebelkerne, wie sie bei der erzwungenen und freiwilligen Kondensation auftreten.

Bei den Versuchen mit Luft war vor Bestrahlung mit Röntgenstrahlen Luft und Wasserdampf in dem Kondensationsgefäß. Wenn ich nun bei Einwirkung der Röntgenstrahlen eine Nebelbildung unterhalb der Ionengrenze bekam, so konnte ich immerhin nichts Genaues über das möglicherweise durch Röntgenstrahlen erzeugte chemische Produkt aussagen. Es konnten einerseits Verbindungen des Stickstoffs, andererseits Verbindungen des Sauerstoffs entstanden sein und als Kondensationskerne unterhalb der Ionengrenze wirksam sein. Die Eigenschaften des auftretenden Nebels waren, wie schon oben erwähnt, solche, wie

sie für Wasserstoffsuperoxydnebel charakteristisch sind. Die Versuche mit reinem Sauerstoff bewiesen, daß jedenfalls Verbindungen des Sauerstoffs in dem in Luft auftretenden Nebel vorhanden sein mußten. Die Versuche in reinem Stickstoff zeigen durch ihr negatives Resultat, daß eine nicht etwa stickstoffhaltige Sauerstoffverbindung die Kondensation von Wasserdampf unterhalb der Ionengrenze hervorruft. Da nun Ozon, welches ja auch bei der Bestrahlung von Luft oder Sauerstoff auftreten könnte, nicht direkt kondensierend wirken kann, wie die Versuche von R. v. Helmholtz und F. Richarz, E. Barkow, E. Pringal, C. Leithäuser und R. Pohl und W. Bieber zeigen, so bleibt nur die eine Erklärung, daß Wasserstoffsuperoxydkerne die Ursache für die Kondensation sind. Hierauf deuten auch die Eigenschaften der auftretenden Nebel hin, wie sie schon oben beschrieben sind. Dafür sprechen ferner auch die von C. Leibfried[1]) angestellten Versuche in reinem, kernfreien Wasserstoff, in welchem ebenfalls keine Nebelbildung unterhalb der Ionengrenze unter Einwirkung der Röntgenstrahlen gefunden werden konnte.

Nach den Versuchen mit Luft, Sauerstoff und Stickstoff und Wasserstoff bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen ist wohl als ziemlich sicher anzunehmen, daß auch bei dieser Bestrahlung Wasserstoffsuperoxyd diejenige hygroskopische Substanz ist, welche die Kondensation von Wasserdampf unterhalb der Ionengrenze bewirkt. Wir müssen nach diesen Versuchen wohl annehmen, daß eine chemische Wirkung der Röntgenstrahlen vorliegt, und zwar scheinen die weichen Röntgenstrahlen chemisch wirksamer zu sein, was die Versuche mit den durch Kupferbleche filtrierten Röntgenstrahlen beweisen. Die weichen Strahlen werden in dem Kondensationsgefäß stärker absorbiert, und darum ist ihre chemische Wirksamkeit eine größere. Da die Menge der in dem oberen Teil des Kondensationsgefäßes absorbierten Strahlung naturgemäß größer sein muß als in dem unteren Teil, mußte auch die Kondensationserscheinung in dem oberen Teile des Gefäßes stärker sein als weiter unten im Gefäß. Das war in der Tat

[1]) C. Leibfried, Diss. Marburg 1914, S. 19.

auch immer zu beobachten. So trat z. B. die erste Tropfenbildung bei der freiwilligen Kondensation immer in der oberen Kugelkalotte des Expansionsgefäßes ein, um sich allmählich erst nach unten auszubreiten. Die chemische Wirksamkeit der Röntgenstrahlen ist wohl ähnlich zu erklären, wie die der ultravioletten Strahlen. In unserem besonderen Falle werden beim Einfluß der Röntgenstrahlen die Sauerstoffmoleküle (O_2) dissoziiert in Sauerstoffatome (O), die sich mit dem Wasserdampf zu Wasserstoffsuperoxyd vereinigen. Wenn nun die Röntgenstrahlen die Bildung von hygroskopischen Wasserstoffsuperoxydkernen hervorrufen, so ist damit aber noch nicht ohne weiteres der starke Einfluß der Dauer der Bestrahlung auf die Erniedrigung der Kondensationsgrenze zu erklären. Es können wohl durch längere Bestrahlung und auch durch intensivere Bestrahlung mehr Kerne gebildet werden; es müßte aber zu ihrer Sichtbarmachung bis zur Tropfenform immer dieselbe Entspannung und damit dieselbe Übersättigung im Kondensationsgefäß hervorgerufen werden, um die einzelnen Wasserstoffsuperoxydkerne zu einer sichtbaren Größe anwachsen zu lassen. Die Wasserstoffsuperoxydmoleküle oder Molekülkomplexe werden bei einem bestimmten Sättigungsgrad Wasserdampf infolge ihrer hygroskopischen Eigenschaft aus der Umgebung aufnehmen. Da sich durch die Aufnahme des Wasserdampfes die Konzentration an Wasserstoffsuperoxyd in dem Konzentrationspunkt verringert, kann dieses Wachsen nur soweit fortschreiten, bis die vorhandene Oberflächenspannung des Tropfens im Gleichgewicht ist mit der Dampfspannung im Nebelgefäß. Soll das vorhandene Konzentrationsprodukt nur durch Aufnahme von Wasserdampf bis zur sichtbaren Tropfengröße wachsen, so muß künstlich eine Übersättigung hervorgerufen werden, welche für alle diese Konzentrationsprodukte fast gleichgroß ist. Wird nun aber durch längere Bestrahlung oder durch eine intensivere Bestrahlung die Anzahl der Konzentrationsprodukte von der oben beschriebenen Größe vermehrt, so werden sich leicht mehrere zusammenlagern. Diese Konzentrationsprodukte von etwas größerem Radius werden nun wieder so lange wachsen, bis wieder Gleichgewicht hergestellt ist. Um sie auf sichtbare Tropfengröße zu bringen, ist nur eine kleinere Ent-

spannung als oben beschrieben notwendig. Dieses Aneinanderlagern und Anwachsen der Konzentrationsprodukte wird nun bei genügend langer Bestrahlung soweit vor sich gehen können, daß bei der vorhandenen relativen Feuchtigkeit von 100 % in dem Kondensationsgefäß freiwillige Nebelbildung zu beobachten ist. Setzen wir mit der Bestrahlung noch genügend früh vor dem Eintreten der freiwilligen Kondensation aus, so werden sich die gebildeten unsichtbaren Konzentrationsprodukte wegen ihrer Feinheit eine lange Zeit halten und ganz langsam zu Boden fallen und somit verschwinden. Das konnte ja auch verschiedentlich beobachtet werden. Ist aber die Bestrahlung schon so lange fortgesetzt, daß nur noch ganz kurze Zeit notwendig sein würde, um freiwillige Kondensation hervorzurufen, so muß diese auch beim Aussetzen der Bestrahlung spontan eintreten können, da ja eine genügend große Anzahl von genügend großen Konzentrationsprodukten vorhanden ist, welche sich vor dem Herabsinken noch bis zur sichtbaren Tropfengröße vereinigen können, so daß also noch nachträglich eine freiwillige Kondensation eintritt. Auch diese Erscheinung konnte in der Tat beobachtet werden. Es wurde einmal der Sauerstoff bei einer primären Stromstärke im Induktorium von 12 Ampere $2^1/_4$ Minuten lang bestrahlt. Nach Tabelle VI sollte freiwillige Kondensation nach $2^1/_2$ Minuten Bestrahlung eintreten. Als nach $2^1/_4$ Minuten Bestrahlungsdauer die Bestrahlung ausgesetzt und der Sauerstoff sich selbst überlassen wurde, zeigte sich trotzdem nach ungefähr $2^1/_2$ Minuten gesamt, $^1/_4$ Minute nach dem Aufhören der Bestrahlung, eine freiwillige Kondensation, die allerdings nicht so stark war, als wenn volle $2^1/_2$ Minuten bestrahlt worden wäre. Man könnte nun noch fragen, welche Entspannungsgröße notwendig ist, um die allerersten Kerne, welche noch nicht durch Zusammenlagerung und auch noch nicht durch Anlagerung von Wasserdampfmolekülen vergrößert sind, zur sichtbaren Tropfengröße zu bringen. Nach den Versuchen, wie sie Tabelle Ia und IIa zeigt, ist bei der kürzesten Bestrahlung von 1 Sekunde die Entspannungsgröße jedenfalls nicht wesentlich verschieden von 15 cm, also von der Entspannungsgröße, wie sie auch die Ionen zur sichtbaren Größe bringt. Wenn man aus

dem Verlauf der Kurven Schlüsse ziehen wollte, so müßte man annehmen, daß die untere Entspannungsgrenze der reinen ursprünglichen Wasserstoffsuperoxydkerne jedenfalls nicht unter 15 cm liegt. Da nun die negativen Ionen schon bei 15 cm Entspannung kondensierend wirken, so würde die untere Entspannungsgrenze der reinen ursprünglichen Wasserstoffsuperoxydkerne anscheinend höher liegen als die für negative Ionen.

Nachtrag. Ergänzende Versuche.

I. Gleichheit der von ultravioletten und von Röntgenstrahlen erzeugten Kerne.

Zur Prüfung der gefundenen Resultate sollten noch einige kontrollierende Versuche angestellt werden. Nach den von W. Bieber mit ultravioletten Licht und nach den von mir mit Röntgenstrahlen angestellten Versuchen erzeugen ultraviolettes Licht sowie Röntgenstrahlen „Kerne“ von derselben chemischen Zusammensetzung, nämlich H_2O_2-Kerne. Dieses Resultat konnte durch folgenden Versuch bestätigt werden: Mit Wasserdampf gesättigte, gereinigte Luft wurde vermittels Quarzlampe mit ultravioletten Licht bestrahlt; es konnte dann nach etwa 3 Minuten langer Bestrahlung freiwillige Kondensation von Wasserdampf beobachtet werden. Dann wurde das Nebelgefäß durch häufiges Entspannen und Sichsetzenlassen des Nebels von den durch ultraviolettes Licht gebildeten Kernen wieder befreit. Nun wurde zuerst die mit Wasserdampf gesättigte Luft etwa 1 Minute mit ultravioletten Licht, wodurch noch keine freiwillige Kondensation eintrat, und sofort danach mit Röntgenstrahlen bestrahlt; es konnte beobachtet werden, daß nach etwa $1^1/_2$ Minuten Bestrahlung mit Röntgenstrahlen freiwillige Kondensation von Wasserdampf eintrat. Nach diesen beiden Versuchen tritt die freiwillige Kondensation ein, ganz gleichgültig, ob nur ultraviolettes Licht oder teilweise ultraviolettes Licht und teilweise Röntgenstrahlen auf mit Wasserdampf gesättigte Luft einwirken. Es müssen also sowohl Röntgenstrahlen als auch ultraviolettes Licht gleicherweise „Kerne“ erzeugen, an denen sich der Wasserdampf kondensieren kann. Andrerseits

könnte man behaupten, daß ausschließlich ultraviolettes Licht die „Kerne“ erzeugt, während die Röntgenstrahlen nur den Wasserdampf um die vorhandenen Kerne ansammeln. Wäre diese Annahme richtig, dann darf die freiwillige Kondensation nicht in derselben Weise eintreten, wenn mit Wasserdampf gesättigte, gereinigte Luft zuerst $1^1/_2$ Minuten mit Röntgenstrahlen, darauf 1 Minute mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird. Dieser Versuch wurde in der angegebenen Weise angestellt, und es ergab sich das Resultat, daß nach insgesamt $2^1/_2$ Minuten gesamter Bestrahlungszeit auch bei Beginn mit $1^1/_2$ Minuten Röntgenstrahlen und am Schluß mit ultravioletten Strahlen wieder freiwillige Kondensation eintrat. Also war einwandfrei festgestellt, daß nicht nur ultraviolettes Licht, sondern auch Röntgenstrahlen in gleicher Weise „Kerne“ erzeugen, an denen sich der Wasserdampf kondensieren kann.

II. Bestrahlung reinen Wasserdampfs in Abwesenheit von Sauerstoffgas gibt keine Kerne.

Daß diese von Röntgenstrahlen gebildeten „Kerne“ H_2O_2-Kerne sind, die sich durch Oxydation von Wasserdampf bilden, ist bereits durch die Hauptversuche festgestellt.

Auch folgender nachträglich angestellter Versuch spricht dafür, daß die H_2O_2-Kerne in der angegebenen Weise von Röntgenstrahlen gebildet werden: In einem ca. 1 l fassenden Dumas-Kolben wurde destilliertes Wasser zum Verdampfen gebracht. Nachdem längere Zeit der Dampf entwickelt worden und somit die im Glaskolben vorhandene Luft mit ihren Nebenbestandteilen von dem sich immer mehr entwickelnden Wasserdampf verdrängt war, wurde der Glaskolben zugeschmolzen. Der nun im Dumas-Kolben befindliche reine Wasserdampf wurde $^1/_2$ Stunde lang mit Röntgenstrahlen von derselben Intensität wie bei den anderen Versuchen bestrahlt; es konnte selbst bei dieser langen Bestrahlungszeit keine freiwillige Kondensation beobachtet werden. Also bestätigt dieser Versuch, daß Röntgenstrahlen aus reinem Wasserdampf keine H_2O_2-Kerne bilden können, sondern daß sich die Bildung von H_2O_2 unter Wirkung der Röntgenstrahlen nur bei Anwesenheit von Sauerstoff vollzieht.

Robert Noske, Borna-Leipzig, Großbetrieb für Dissertationsdruck.

Figurentafel.

Fig. 1.

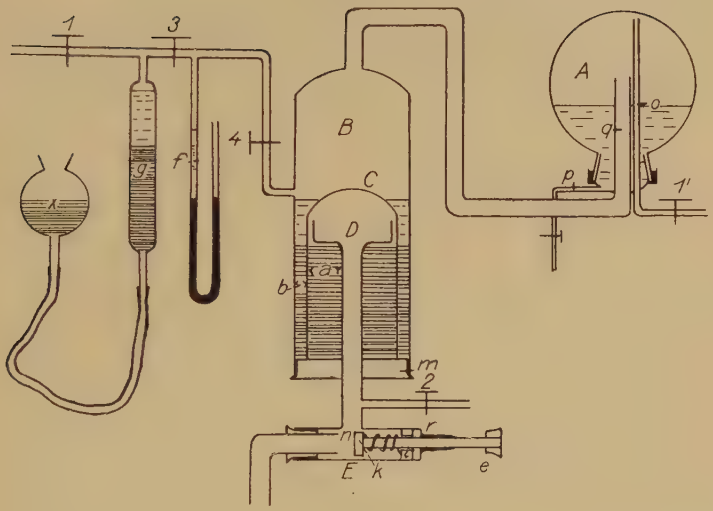
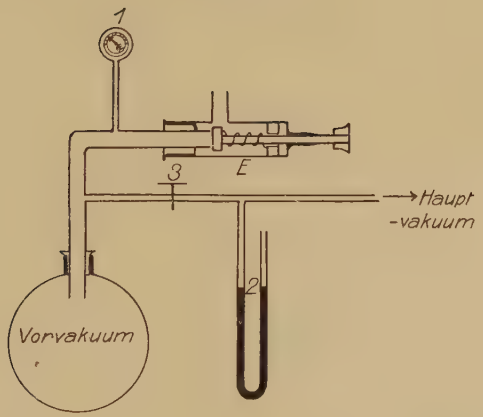


Fig. 2.



Kurventafel.

Fig. 1.
Bestrahlung ohne Kupferblech bei 12 Ampère.
1: Röntgenröhre I. 2: Röntgenröhre II.

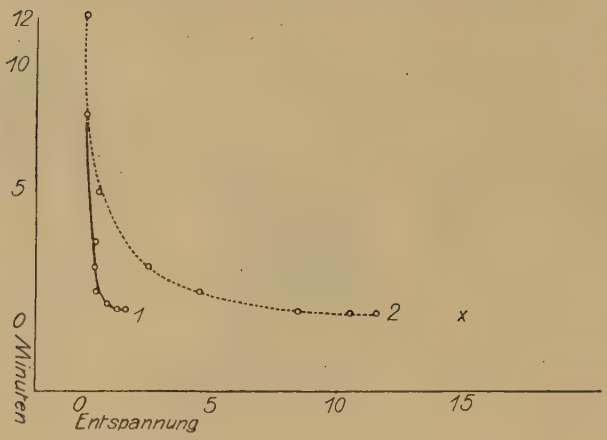
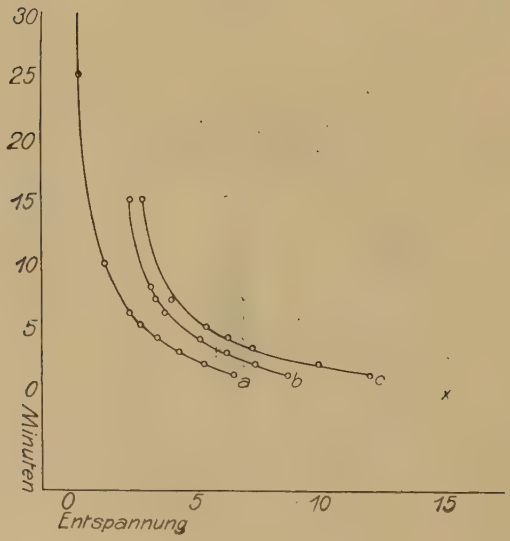


Fig. 2.
Bestrahlung mit Kupferblech.
a) 0,05 mm bei 12 Ampère
b) 0,09 „ „ 12 „
c) 0,14 „ „ 12 „
Röhre I.



Kurventafel.

Fig. 3.

Bestrahlung mit Kupferblech 0,05 mm bei 12 Ampère.
Röhre II.

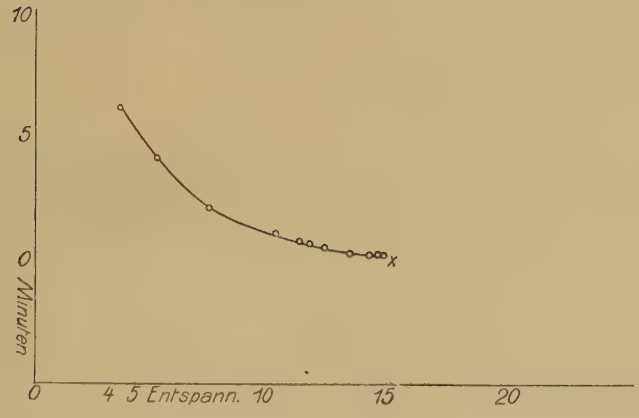
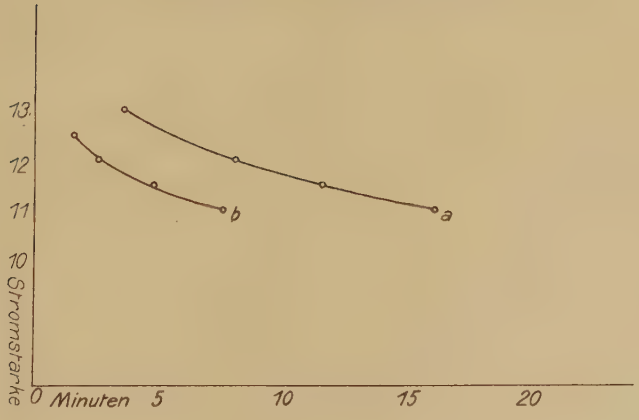


Fig. 4.

Freiwillige Kondensation
a) bei Luft b) bei Sauerstoff.



Vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität Marburg angefertigt.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Prof. Dr. F. Richarz

für die Anregung zu dieser Arbeit und sein dauerndes Interesse an derselben meinen ehrerbietigsten Dank auszusprechen.

Ebenso danke ich herzlichst

Herrn Dr. K. Stuchtey

für die dauernde liebenswürdige Unterstützung bei den Versuchen und der Abfassung dieser Arbeit.

Lebenslauf.

Ich, Otto Ernst Walter Conrad, wurde am 25. Mai 1890 zu Mansfeld (Prov. Sachsen) als Sohn des Kaufmanns Otto Conrad geboren. Ich bin evangelisch-lutherischer Konfession und preußischer Staatsangehöriger. Meinen ersten Schulunterricht genoß ich in der Volksschule zu Mansfeld. Von Ostern 1901 ab besuchte ich die Oberrealschule zu Eisleben, die ich Ostern 1910 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um mich dem Studium der Mathematik und Physik zu widmen. Ich studierte 2 Semester (SS. 1910 und WS. 1910/11) auf der Universität zu Berlin, 3 Semester (SS. 1911, WS. 1911/12 und SS. 1912) auf der Universität zu Halle und vom WS. 1912/13 bis jetzt auf der Universität zu Marburg. Das Rigorosum bestand ich am 8. Dezember 1914. Zu Beginn des Krieges meldete ich mich als Kriegsfreiwilliger. Während meiner Studienzeit beteiligte ich mich an den Vorlesungen und Übungen folgender Herren Dozenten:

in Berlin:

Börnstein, Diels, Frobenius, Knoblauch, Köthner, Lehmann-Filhés, Marcuse, Meyer, Schreiner, Schur, H. A. Schwarz, Spiegel;

in Halle:

Buchholz, Dorn, Eberhard, Fries, Gutzmer, Wangerin, Uphues;

in Marburg:

v. Dalwigk, Feußner, Hartmann, Hellinger, Neumann, Richarz, Schulze, Take, Zincke.